

大域整合性条件による両眼立体視の研究

著者	佐藤 直行
号	2280
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/7553

氏 名	さとう なおゆき
授 与 学 位	佐藤 直行
学位授与年月日	博士（工学）
学位授与の根拠法規	平成11年3月25日
研究科、専攻の名称	学位規則第4条第1項
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電気・通信工学専攻
指 導 教 官	大域整合性条件による両眼立体視の研究
論文審査委員	東北大学教授 矢野 雅文
	主査 東北大学教授 矢野 雅文 東北大学教授 阿曾 弘具
	東北大学教授 山本 光璋

論文内容要旨

柔軟なパターン認識能力を工学的に実現するには、脳の視覚情報処理における基本的機能である分節化における、情報表現、処理機構、知覚過程を解明することが本質的に重要である。現在のコンピュータビジョンは任意の実世界からの入力情報を解析的あるいは論理的に分節化していく一般的な計算論を持たないために、対象として同定すべき入力範囲を自分で決定することはできない。このことが柔軟なパターン認識システムの実現を困難にしている大きな要因である。

私たちが視覚対象物を知覚する場合には、“面”が1つの単位になり、個々の視覚手がかりをまとめている。このような、個々の特徴を統合的に扱い視覚対象物を分節化するプロセスは、コンピュータビジョンとは異なると考えられ、“面”の形成機構を明らかにすることで、パターン認識の問題を解決する手がかりが得られると考えられる。

面の形成機構を研究するための具体的な知覚現象として、最も適した系の1つが両眼立体視である。一般の画像は形・奥行きの手がかりが複雑に絡み合っているが、それらの手がかりを分離して研究できることが望ましい。両眼立体視は、ランダムドットステレオグラム（Random-Dot Stereogram；RDS、Julesz 1971）の存在によって、両眼視差以外の形・奥行きの手がかりを排除して視覚の研究を進められることが利点である。RDSは、それぞれの画像では単なるテクスチャだが、左右画像間のドットの位置の違い（視差）を含む。これを左右の目それぞれで見ると、鮮明な3次元の“面”が知覚される。RDSにより両眼立体視は、心理物理学・神経生理学・計算理論などの背景が充実した分野の1つである。

RDSで特に顕著なのは、視差を定めるためには、左右画像のドット間の対応づけが必要だが、ドットの対応は一意には決められないという問題である。適当な対応を決めるためには3次元の形が必要だが、

形は対応を決める前には決められない。この問題は、両眼対応問題（Marr 1982）と呼ばれる。これは、不良設定問題（Poggioら 1985）の1つであり、解くにはなんらかの拘束条件が必要である。

Marr と Poggio (1976) は拘束条件として、唯一性条件（左右のドットは1対1で対応する）、と連続性条件（画像全体で視差は滑らかに変化する）の2つが適当であることを提案した。さらに、これら条件を実行する、協調的アルゴリズムを提案した。これは、局所的な繰り返し演算によって、広がりをもった対応を得る方法である。しかし、このアルゴリズムでは、2重奥行き面などは扱うことができなかったのも、連続性条件とアルゴリズムが改良された（Pollard et al. 1985, Prazdny et al. 1985）。これらのアルゴリズムによれば、2重奥行き面などの図形も扱うことができた。

RDSにおいても、多義的な面の知覚を与えうることが、Julesz (1964, 1971, Julesz and Chang 1976) により報告されている。このステレオグラムは、水平方向に周期的なドットパターンを含むRDSであり、ambiguously perceivable RDS（多義的な見えを与えうるRDS）と名づけられている。周期的なドットパターンは多様な視差を与えうるので、局所的にも大域的にも、多様な視差を持ちうる。しかし、私たちの知覚としては、四角の平面が全体的に浮いて、もしくは沈んで見える。この奥行き感、数秒のオーダーで安定していることも、Juleszら (1976) により調べられている。

Marrらの協調的アルゴリズムによりambiguously perceivable RDSを扱うと、パッチ状の面しか得られない。この解は、知覚で現れる面とは、まったく異なる。Marrのアルゴリズムの場合、初期状態で確率的に対応が生じ、連続性条件により、それぞれの視差の対応が拡大する。各視差ごとに広がった対応は競合的だが、局所的な対応の評価では、視差面感の競合を大域的に解消することができない。したがって、アルゴリズムの解としてはパッチ状の対応しか得られない。この問題を解決する1つの方法として、連続性条件のサイズを大きくすることが考えられる。しかし、サイズはRDSに含まれる図形の大きさに合わせる必要があるが、対応を定める前には図形の大きさは決められないので、実際上この方法では解決できない。このような意味で、従来の連続性条件を、局所的連続条件とみなす。局所連続条件だけでは、ambiguously perceivable RDSのような、多義的な面間の競合を含む問題を扱うことはできない。このような問題を扱うには、なんらかの大域的な対応の評価が必要である。

Marrらはより生理学的なアルゴリズムとして、第2のアルゴリズムを提案している（1979）。このアルゴリズムでは ambiguously perceivable RDSの問題をpulling effectとして扱っている。pulling effect（Julesz and Chang 1976）とは周期的なテクスチャの領域に一義的なドットを少量加えたときに、多義的な奥行き面の奥行きが一義的になる知覚現象である。第2のアルゴリズムは、低空間周波数の画像の対応から、高空間周波

数の対応へと順番に定めることで、大域的な対応を扱い得る方法といえる。しかし、2重奥行き面の場合、低空間周波数の画像の対応が大域的な対応を表現できず、したがって、左右ドットの1対1対応をうまく満たせないため、このアルゴリズムでは適当な対応を得ることができない。多義的な面を含むRDSと2重奥行き面を含むRDSを同時に扱うためには、ドット間の唯一性条件を確実に満たし、その対応を大域的に評価することが必要である。

そこで、最適な対応を一意に与えるために、対応の大域的な評価を取り入れた両眼立体視モデルを提案した。モデルは2階層のシステムより成る。

まず、下位のシステムは、唯一性条件に従った対応を自由に扱う。唯一性条件だけでは多様な対応が可能であり、この多様な対応を扱うため、dynamicallinking(von der Malsburg 1985, Shimizu et al. 1985)が導入された。dynamicallinkingは、素子の同期的な活動により、素子間の結合関係を表現する方法であり、要素間の関係を自由に組み替えることに適している。下位のシステムは、2枚の振動子の格子から成り、それぞれの振動子は、RDSのドットの値を示す。この格子を、単眼層(a monocular layer)と呼ぶ。単眼層の各振動子は、唯一性条件を実行するよう、水平方向の振動子と結合された。ある振動子の活動は周期的に変動し、結合により近傍の振動子に与える効果は、活動度の符号の変化にあわせ時間的に反転する。すなわち、対応の生成を促す“短距離活性－長距離抑制”と、対応の破壊を促す“短距離抑制－長距離活性”を時間的に繰り返す。モデルのパラメータは、それぞれの効果が時間的に打ち消し合うよう決められたため、対応は準安定的に成り得る。

次に、上位のシステムは、 ± 3 視差を示す7つの層より成る。各層を、統合層(an integration layer)と呼ぶ。各統合層は、それぞれが司る視差の対応によって、各画像位置が励起される。この活動度は層内で拡散・減衰するので、受けた対応の数によって大きな活動度を持つことになる。各画像位置における大域的な対応の評価は、各統合層の活動度の比として表現される。活動度の比は、距離に依存しない対応の程度を表すことができる。

上位システムの各位置の活動度の大きさは、下位システムの単眼層の振動子間の結合強度としてfeedbackされる。修飾の大きさは、局所的な対応を大域的な対応の積として表せる。ある大域的な対応の評価が、両者が整合的な場合には、対応は自己触媒的に発展し、一方、整合的でない場合には対応は安定せず、励起の数が増えないので発展しないことが期待できる。すなわち、この修飾によって、下位システムの準安定的な対応は、上位システムで表現された対応の大域的な適切さに基づき、安定化される。

シミュレーション結果は、次の5つの場合について示した。(1)、統合層からの修飾をカットした場合、単眼層に生じる対応は空間的な秩序がなく、また時間的にも発展せず、変動的であった。これは、単眼層の対応が準安定的であることを示す。(2) 統合層からの修飾を受けた場合、1振動目から適切な対応が生じ、以降3振動ほどで収束した。このとき、統合層と単眼層の対応は同時的に発展することが示された。この時間発展は、統合層がslavingによって対応を安定させるわけではないことを示す。(3) 単眼層と統合層の相互作用を見るため、入力を突然変化した場合について調べた。入力変化時には、統合層の活動度が1振動ほどの時間で減衰し、以降の3振動ほどで適切な対応が生じた。これは、モデルの収束が初期値によらないことを示す。(4) 多義的な見えを与えるRDSについて調べた。1振動目では、いくつかの可能な対応が生じるが、すぐに大域的に適切な対応に収束した。この結果は、大域的な対応の評価によるものである。知覚的にはいくつかの見えが可能であるが、モデルでは、初期値によって確率的に1つの大域的な対応に収束する。(5) 単に大域的な対応が発展するのであれば、2重奥行き面を含むRDSは扱えないはずである。モデルでは2重奥行き面についても適切な対応が得られた。このときの正答率を考えたとき、局所的な拘束条件によるアルゴリズムとくらべて、良い結果が得られた。これらの結果は、最適な対応が大域的な対応との整合性によって得られることを示した。

以上の結果をまとめると、下位のシステムではdynamical linkingにより準安定的な対応を生成し、上位のシステムでは下位のシステムで生じた対応から、大域的な対応の評価値を得た。この値を下位のシステムの対応にfeedbackすることで、最適な対応を得ることができた。対応の収束は、階層的なシステム間の対応が整合的になることで得られ、この条件を大域整合性条件 (a global consistency constraint) と名づけた。これにより、多義的な見えを与えるRDSと2重奥行き面を含むRDSを同時に扱うことができた。ここで、要素の準安定的な性質を用い整合性を得る方法は、システム間の整合性を得る方法として汎用性がある。また、両眼立体視のモデルとして、大域的な対応を陽に扱ったモデルとしてはじめてのものである。

さらに、この方法論を多重奥行き面を生じる種々のRDSに適用し、多重の空間スケールをもつ両眼立体視モデルが可能になることを示した。ここで、対応の空間的な秩序を、いくつかの空間スケールの対応の整合性として扱う。シミュレーション結果はドット密度によらないことから、大域整合性条件にもとづくシステムの汎用性の広さを示している。

審査結果の要旨

柔軟なパターン認識能力を工学的に実現するには、脳の視覚情報処理における基本的機能である分節化—画像要素がそれぞれ帰属すべき知覚物体へと分割する機能—における、情報表現、処理機構、知覚過程を解明することが本質的に重要である。現在のコンピュータビジョンは任意の実世界からの入力情報を解析的あるいは論理的に分節化していく一般的な計算論を有しないために、対象として同定すべき入力範囲を自分で決定することは出来ない。このことが柔軟なパターン認識システムの実現を困難にしている大きな要因である。

著者は脳の視覚情報処理における分節化の自己組織過程の機能に着目し、単眼では形態の情報が得られないランダムドットからなる左右一対の刺激図形から奥行き面を知覚する両眼立体視を対象として、パターン認識における分節化の計算論の研究を行った。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、両眼立体視の計算論を概説し、従来の計算論の定式化とアルゴリズムにおける問題点をまとめている。従来の両眼立体視の計算論では局所的な拘束条件を用いているために、多重奥行き面を一意に決定することが出来ない。著者はこれを解決するために、面の分節化を陽に処理できる計算論の必要性を指摘している。

第3章では、局所的な演算をする入力層と、大域的な演算をする統合層を結合することによって、面の分節化を陽に取り扱う計算論を提案している。入力層を多義的で準安定な対応関係を生成することが出来る非線形振動子ネットワークにより構成し、左右の画像の多様な関係性を取り出すことを可能にするとともに、この入力層からの情報を受ける上位の統合層において大域的な対応を自己組織的に評価するように構成している。これは局所の多義的な対応から大域的で一意的な対応を得る分節化を実現する計算論的モデルを与えたもので、評価できる。

第4章では、上記の方法論を多重奥行き面を生じる種々のランダムドット図形に適用し、多重の空間スケールを持つ両眼立体視が可能になることを計算機実験により示している。この実験で面の分節化が画像のドット密度によらないことも明らかにし、面の分節化を自己組織的に計算するモデルの汎用性を示している。これはこのモデルの有効性を示すもので、興味深い知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、パターン認識の計算論として左右の両眼視差のみを手がかりとして、任意の図形の3次元像を再構成する方法論を提案し、その有効性を実証したもので、パターン認識工学、情報通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。